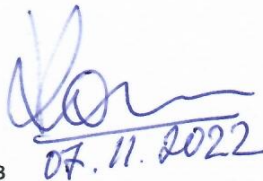


**Проведение сравнительной экспертизы двух проектов
сверхпроводящего магнита эксперимента SPD NICA**

Работа выполнялась в соответствии с техническим заданием по договору подряда
с ОИЯИ № 100/126 от 25.10.2022

Исполнитель:



07.11.2022

Е.К.Кошурников

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

1	ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ СРАВНЕНИЯ ПРОЕКТОВ КРИОСТАТА СО СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ОБМОТКОЙ	3
2	ОРГАНИЗАЦИИ, ПРЕДСТАВИВШИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ	3
3	ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ ПРЕДСТАВЛЕННЫХ НА РАССМОТРЕНИЕ	3
4	ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ПРЕДЛАГАЕМЫМ ПРОЕКТАМ	3
5	ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ПРОЕКТОВ В ТЕКУЩИХ УСЛОВИЯХ	4
6	ЗАМЕЧАНИЯ ПО КОНСТРУКЦИИ	5
7	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	7

1 ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ СРАВНЕНИЯ ПРОЕКТОВ КРИОСТАТА СО СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ОБМОТКОЙ

Проекты сравнивались в первую очередь по следующим критериям:

- a) Оценка надежности работы магнитной системы, изготовленных в соответствии с предлагаемыми проектами
- b) Возможность реализации предлагаемых проектов в текущих условиях

2 ОРГАНИЗАЦИИ, ПРЕДСТАВИВШИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ

- A. ИЯФ СО РАН, Новосибирск
- B. ЛФВЭ ОИЯИ

3 ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ ПРЕДСТАВЛЕННЫХ НА РАССМОТРЕНИЕ

Для рассмотрения предложены материалы Technical Design Report of the Spin Physics Detector раздел 5 Магнитная система. Draft version 2022.050 dated October 25, 2022. В draft TDR включены тексты эскизных (не технических) проектов по магниту

В качестве магнитной системы в разделе 5 рассматривается только криостат со сверхпроводящей обмоткой в отрыве от магнитопровода.

- | | |
|--------------------|--------------|
| A. 1. Вариант ИЯФ | Стр. 56 - 92 |
| B. 2. Вариант ОИЯИ | Стр. 92 - 99 |

4 ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ПРЕДЛАГАЕМЫМ ПРОЕКТАМ

4.1 ИЯФ

Технические решения в выбранном варианте конструкции криостата и сверхпроводящей обмотки соответствуют современным тенденциям создания сверхпроводящих детекторных магнитов, которые предусматривают:

- наличие системы охлаждения сверхпроводящей катушки за счет естественной конвекции двухфазного гелия (эффект термосифона), что позволяет избежать аварийного вывода энергии из сверхпроводящей обмотки при кратковременном пропадании электроэнергии в экспериментальном зале и продолжить работу после возобновления ее подачи без перехода в режим повторного захлаживания обмотки;
- использование косвенной системы охлаждения сверхпроводящей обмотки от теплообменника на наружной поверхности бандажного цилиндра, что резко повышает надежность системы охлаждения за счет минимизации числа криогенных трубопроводов в криостате;
- использование сверхпроводящего провода, полученного методом совместной экструзии плоской скрутки NbTi/Cu жил с алюминием высокой чистоты, что обеспечивает высокий уровень стабильности проводника и высокую среднюю теплопроводность обмотки.

Надежность работы магнитов, изготовленных в соответствии с выбранными техническими решениями, подтверждается успешным опытом создания и эксплуатации ранее созданных магнитных систем, таких как, Zeus, BaBar, ATLAS, CMS, Mu2e итд.

4.2 ОИЯИ

К сожалению, в представленных материалах преимуществ данного варианта в процессе эксплуатации магнита в сравнении с вариантом ИЯФ, не представлено, а вот его недостатки очевидны:

- Главной проблемой данного варианта магнитной системы является то, что при кратковременном прекращении циркуляции гелия необходимо аварийно выводить энергию из обмотки, а затем начинать с режима повторного захлаживания. Если речь идет о магнитах с небольшой запасенной энергией, то это не проблема. Но если речь идет о магните с энергией порядка 15 МДж, то пара выключений электроэнергии в зале в течение суток на несколько минут, практически не влияющие на работу магнитной системы с термосифонным охлаждением, приведет к достаточно длительному перерыву в случае охлаждения обмотки сверхкритическим гелием.
- Еще одной важной проблемой такого магнита является его существенно более низкая надежность из-за наличия в обмотке большого числа соединений трубок охлаждения и электрических межсекционных соединений. Чем больше соединений, тем меньше надежность. Подобные соединения являются слабым местом всех типов магнитов. В случае обнаружения течи в трубках охлаждения, расположенных внутри сверхпроводящей обмотки, секцию катушки придется выбросить. Течь в контуре охлаждения обмотки с косвенным охлаждением потребует разборки криостата и ремонта трубки охлаждения, но самая дорогостоящая часть магнитной системы, катушка, не пострадает.

В системе охлаждения предполагается использование однофазной схемы охлаждения сверхкритическим гелием. Однако, принудительное, двухфазное охлаждение дает определенные преимущества по сравнению с однофазной системой. К этим преимуществам можно отнести то, что:

- при двухфазном течении локальные тепловыделения будут поглощаться скрыто, т.е. это будет почти изотермическое охлаждение,
- потребуются меньшие массовые расходы,
- отсутствие циркуляционного насоса, если таковой предусмотрен в схеме ОИЯИ.

5 ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ПРОЕКТОВ В ТЕКУЩИХ УСЛОВИЯХ

Для того, чтобы передать один из представленных в разделе 5 проектов изготовителю еще очень и очень далеко. Для начала надо доработать эскизный проект. Пока отсутствует описание согласованных интерфейсов криостата с магнитопроводом и детекторами, нет подробного описания конструкции, нет чертежа криостата с холодной массой и контрольным дьюаром, нет согласованной с ОИЯИ конфигурации сверхпроводящей катушки (приводятся несколько вариантов ее конфигурации), отсутствуют результаты важных механические расчетов, нет расчетов переходного процесса после появления нормальной зоны, нет тепловых расчетов, нет описания режимов работы магнита.

5.1 ИЯФ

Общая концепция криостата со сверхпроводящей обмоткой понятна из приведенного описания и в целом соответствует общей тенденции при создании подобных магнитов. В зависимости от

конкретных условий, конечно, могут быть некоторые вариации, но основные черты конструкции подобных детекторных магнитов, следующие:

- проводник, изготовленный ко-экструзией плоской скрутки NbTi жил в медной матрице с алюминием высокой чистоты,
- алюминиевый опорный цилиндр снаружи обмотки и
- охлаждение катушки за счет косвенной передачи тепла к жидкому двухфазному гелию, циркулирующему в теплообменнике на наружной поверхности опорного цилиндра за счет естественной конвекции (термосифонный эффект).

Конечно, лучшим местом для изготовления такого криостата со сверхпроводящей обмоткой была бы фирма ASG (Genova, Italy), специализирующаяся на создании сверхпроводящих магнитных систем различного назначения. Там, в 2017 -2018 годах, на деньги ОИЯИ были куплены и установлены намоточный станок для укладки сверхпроводящего провода на внутренней поверхности алюминиевого опорного цилиндра и печь для однородного прогрева катушки в процессе компаундирования. Там же есть квалифицированный персонал, имеющий многолетний опыт изготовления аналогичных магнитных систем.

С учетом отсутствия текущей возможности размещения заказа в ASG, можно рассматривать возможность изготовления криостата со сверхпроводящей обмоткой в мастерских ИЯФ, что видимо и подразумевали авторы проекта.

В этом случае предполагается изготовить соленоид не путем укладки проводника на внутренней поверхности бандажного цилиндра, а путем горячей посадки цилиндра на внешний диаметр уже намотанной сверхпроводящей катушки. Конструктивная схема и технология изготовления сверхпроводящей катушки подобных радиальных размеров с горячей посадкой алюминиевого бандажного цилиндра на ее внешний диаметр за последние десятилетия уже достаточно хорошо отработана, начиная с магнита CDF и кончая магнитами Mu2e. Конечно, оборудование и технологии, используемые в ИЯФ далеко не самые современные, но, в принципе, возможность для разработки собственными инженерными кадрами и изготовления криостата со сверхпроводящей обмоткой с помощью имеющегося оборудования в мастерских ИЯФ есть.

Хотя логично было бы выбрать изготовителя с помощью тендерной процедуры, в которой мог бы поучаствовать НИИЭФА и китайские изготовители.

4.2. ОИЯИ

Если все же придется выбрать такой вариант магнита, то надо заранее учитывать, что изготовителю придется разрабатывать конструкцию криостата и сверхпроводящей обмотки без возможности опереться на опыт ранее изготовленных магнитов. Кроме того, придется потратить длительное время на разработку, изготовление и испытания полномасштабных моделей катушки.

6 ЗАМЕЧАНИЯ ПО КОНСТРУКЦИИ

6.1 ИЯФ

- 6.1.1 Зазоры 20 мм между наружным диаметром криостата и внутренней поверхностью балок магнитопровода маловаты для сборки магнита с учетом возможных последующих перемещений криостата для компенсации децентрирующих сил. Увеличить это расстояние, например, до 200 мм можно за счет переноса 3-х слотов мюонной системы на внешний

радиус. Это можно сделать достаточно просто, если убрать из конструкции тележку для перемещения магнитопровода. Эта тележка была унаследована разработчиком магнитопровода из проекта магнитопровода PANDA. Но там она появилась поскольку в нижнем подбрюшье магнита необходимо было освободить пространство для Target beam dump и для его обслуживания, в детекторе SPD это пространство не используется. Если в детекторе SPD переместить 3 слоя мюонной системы на наружный радиус, то оставшегося после такого перемещения пространства внизу вполне достаточно для размещения четырех опор с роликовыми тележками. Для половинок дверей нужны собственные рельсовые пути на полу, не связанные с бочкой магнитопровода.

- 6.1.2 Смещение криостата относительно магнитопровода и его фиксация от действия магнитных децентрирующих сил с помощью механических домкратов — это неплохой вариант. Однако, аксиальная фиксация положения криостата с упором в его фланцы в области вакуумных уплотнений — это плохая идея.
- 6.1.3 В конструкции термического экрана на Figure 5.33: Cryostat thermal shield трубки теплообменника расположены параллельно оси магнита. Однако, для исключения появления застойных зон трубки должны быть выполнены наклонными.
- 6.1.4 Разделение труб верхнего и нижнего коллектора теплообменника холодной массы на две параллельные трубки были выбраны в Тех. проекте PANDA для того, чтобы исключить пересечения с узлами радиальной подвески холодной массы и токовыми выводами. Такое решение несколько усложняло конструкцию теплообменников за счет лишних сварок. В данном случае можно обойтись без этого, так как предполагается использовать другой тип подвески.
- 6.1.5 Предполагается использовать параллельное включение нескольких источников питания с преобразованием частоты. К сожалению, такие источники не обладают высокой надежности. Рекомендуется всегда держать под рукой запасные источники питания. Более целесообразно было бы применение более надежного тиристорного источника питания с двенадцатипульсовой схемой выпрямления и транзисторным фильтром на выходе.
- 6.1.6 Запасенная обмоткой энергия посчитана очень грубо. На самом деле она не 19.3 МДж, а близка к 15 МДж при номинальном поле в центре 1 Т и 10% запасе по току.
- 6.1.7 Фланцы на катанных алюминиевых цилиндрах бандажей должны быть приварены, а не прикручены болтами. Большие зазоры между соседними секциями катушки магнита PANDA появились вследствие того, что PANDA это мишенный спектрометр, в котором через обмотку надо было провести трубу мишени. Второй промежуток между катушками появился только из соображений обеспечения симметрии поля. В случае магнита SPD торцы секций обмотки должны соприкасаться друг с другом через корпусную изоляцию.
- 6.1.8 В соответствие с основополагающим электротехническим принципом непрерывности корпусной изоляции она должна присутствовать на всей наружной поверхности обмотки. Исключение корпусной изоляции на внутренней поверхности катушки (строки TDR 1151-1152) недопустимо. Дело в том, пробивное напряжение для вакуумного промежутка зависит от давления газа и расстояния между электродами в соответствие с кривой Пашена. В случае если криостат теряет вакуум из-за утечки гелия, то надо срочно разряжать обмотку и при отсутствии корпусной изоляции на участке катушки пробивное напряжение может быть очень низким.
- 6.1.9 Общепринятый критерий максимально допустимой температуры в обмотке после ее перехода в нормальное состояние с точки зрения температурных деформаций не 100 К, а 120 К.

Согласно общепринятой практике, допустимая скорость захлаживания сверхпроводящей обмотки ограничивается скоростью 0.5- 1 К/час, а не 4 К/час.

7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 7.1 По сути, в проекте ИЯФ содержатся достаточно детальные заимствования из Технического проекта магнита PANDA (FAIR, GSI). И это хорошо, так как позволяет рассчитывать, что магнит будет сделан в русле современных решений.
- 7.2 Судя по длине кусков проводника, использованных в разработке ИЯФ, сверхпроводящий провод является нереализованным наследием проекта PANDA. Однако, провод не оптимизирован под проект магнита SPD и содержит излишнее количество сверхпроводника в сечении.
- 7.3 Проект ОИЯИ тоже базируется, в первую очередь, на хорошо отработанной в ОИЯИ технологии изготовления провода для магнитов Нуклотрона, который по своей конструкции и параметрам не очень подходит для магнита SPD.
- 7.4 В обоих случаях (ИЯФ и ОИЯИ) целесообразно рассматривать проводник, оптимизированный специально для данного проекта, а не пытаться воспользоваться имеющимися в распоряжении проводником или технологией изготовления.
- 7.5 Более перспективным с точки зрения достижения конечного результата является проект ИЯФ, так как по потребительским характеристикам вариант магнита ОИЯИ будет уступать магниту, изготовленного по варианту ИЯФ, из-за более высокой вероятности выхода магнита из строя и необходимости вывода энергии их катушки при каждом пропадании электропитания в зале. Но приступить к изготовлению магнита по представленному ИЯФ проекту можно будет только после его полной переработки.